

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift
10 DE 196 32 829 A 1

51 Int. Cl.⁶:
G 01 M 11/02

21 Aktenzeichen: 196 32 829.2
22 Anmeldetag: 14. 8. 96
43 Offenlegungstag: 20. 3. 97

DE 196 32 829 A 1

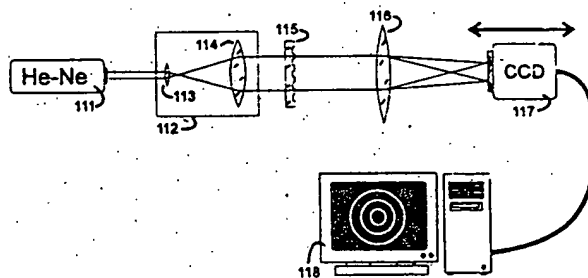
30 Innere Priorität: 32 33 31
14.08.95 DE 195298608 21.12.95 DE 195478711

71 Anmelder:
Maier, Max, Prof. Dr., 93053 Regensburg, DE

72 Erfinder:
Maier, Max, Prof. Dr., 93053 Regensburg, DE; Niggel,
Lutz, Dipl.-Phys., 93047 Regensburg, DE

54 Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung von Linsenparametern

57 Die Erfindung schafft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Bestimmung der Brennweite oder der Brechkraft einer sphärischen Testlinse oder eines Linsensystems, oder der Brechkraft einer astigmatischen Linse in ihren beiden Hauptmeridianen sowie insbesondere auch deren Lage. Hierbei werden mindestens eine Lichtquelle (111), ein ein konisches Lichtbündel erzeugendes Element (115), die zu testende Linse oder das zu testende Linsensystem (116), ein Detektor (117) zur Bestimmung der Intensitätsverteilung in der oder den Brennebenen sowie vorzugsweise eine Auswerteeinheit (118) verwendet.



DE 196 32 829 A 1

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Bestimmung der Brennweite bzw. der in der Augenoptik verwendeten Brechkraft einer Linse, wie z. B. eines Brillenglases, oder eines Linsensystems, wie es z. B. ein Kamera-Objektiv darstellt, nach dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1. Außerdem umfaßt das Verfahren die Bestimmung der Brennweiten in den Hauptmeridianen astigmatischer Linsen sowie der Lage dieser Hauptmeridiane.

Solche Verfahren sind seit langer Zeit bekannt und wurden bereits in vielen Variationen beschrieben (als Beispiel seien die Offenlegungsschriften¹⁾ DT 25 08 611,²⁾ DE 30 48 132,³⁾ DE 32 08 024 A1 und⁴⁾ DE 42 42 479 A1 aufgeführt). Die dort beschriebenen Verfahren und Vorrichtungen sind oft kompliziert in der Anwendung und Herstellung und nur mit großem Aufwand automatisierbar.

Es ist die Aufgabe der Erfindung, eine Vereinfachung dieser Verfahren bzw. Vorrichtungen zu bewirken.

Bei dem Verfahren nach dem Patentanspruch 1 wird die Brennweite bzw. Brechkraft der zu vermessenden Linse oder des zu vermessenden Linsensystems durch Messung der Intensitätsverteilung in einer Ebene hinter der zu untersuchenden Linse, die mit einem konischen Lichtbündel beleuchtet wird, bestimmt. Vorrichtungsmäßig wird die gestellte Aufgabe durch eine Apparatur nach Anspruch 27 gelöst.

Die Erfindung gemäß dem Patentanspruch 1 zeichnet sich durch ein äußerst einfaches Verfahren aus, das außerdem kostengünstig zu realisieren ist. Eine Automatisierung ist ohne weiteres möglich. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß für die Bestimmung der Brennweiten keine Entfernungen zur Linse bzw. zu ihren Hauptebenen gemessen werden müssen. Dies ist insbesondere bei Linsensystemen von Vorteil, da die Position ihrer Hauptebenen nicht bekannt sein muß. Bei der Vermessung von astigmatischen Linsen genügt die Messung der Intensitätsverteilung in nur einer Ebene, um beide Brennweiten in den Hauptmeridianen zu bestimmen.

Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen und deren Kombinationen und werden aus der folgenden Beschreibung im Zusammenhang mit den beiliegenden Zeichnungen ersichtlich:

Fig. 1 zeigt eine Aufnahme der Helligkeitsverteilung eines BESSEL-Lichtbündels in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung.

Fig. 2 zeigt die Intensitätsverteilung $I(r)$, die man entlang der gestrichelten Linie in Fig. 1 erhält. Sie ist näherungsweise gegeben, durch das Quadrat der BESSEL-Funktion nullter Ordnung und erster Art, J_0^2 .

Fig. 3A zeigt die schematische Darstellung der Intensitätsverteilung $I(x, y)$ in Form eines Rings mit dem Durchmesser d in der hinteren Brennebene einer sphärischen Sammellinse, die mit einem konischen Lichtbündel beleuchtet wird.

Fig. 3B zeigt die schematische Darstellung der Intensitätsverteilung $I(x, y)$ in Form eines Ovals mit den Hauptachsen a und b in einer Brennebene einer astigmatischen Linse, die mit einem konischen Lichtbündel beleuchtet wird. Der Abstand der Streifen im Oval beträgt Δd .

Fig. 4 zeigt die Schnittdarstellung eines Axicons, das zur Erzeugung konischer Wellen verwendet wird. R ist der Radius und H die Höhe des Axicons.

Fig. 5 zeigt ein radialsymmetrisches, binäres Amplitudengitter mit der Gitterkonstanten p .

Fig. 6 zeigt die Schnittdarstellung eines radialsymmetrischen, binären Phasengitters mit der Gitterkonstanten p und der Stufenhöhe T .

Fig. 7 zeigt binäres Off-Axis Amplitudengitter.

Fig. 8 zeigt eine Photographie der Ringe in der hinteren Brennebene einer sphärischen Sammellinse, die mit den, durch ein Off-Axis Gitter erzeugten, konischen Wellen beleuchtet wurde.

Fig. 9 zeigt eine Photographie der Ringe in der hinteren Brennebene einer sphärischen Sammellinse, die mit den, durch ein Phasengitter erzeugten, konischen Wellen beleuchtet wurde.

Fig. 10 zeigt eine Photographie des Ovals in einer der hinteren Brennebenen einer astigmatischen Linse, die mit den, durch ein Phasengitter erzeugten, konischen Wellen beleuchtet wurde.

Fig. 11 zeigt ein Beispiel einer Ausführung der Erfindung. Dabei bedeuten:

111: Helium-Neon Laser.

112: Aufweitungsoptik.

113: Sammellinse mit $f = 100$ mm.

114: Sammellinse mit $f = 1000$ mm.

115: Radialsymmetrisches binäres Phasengitter.

116: Testlinse.

117: CCD-Kamera.

118: Auswertecomputer.

Fig. 12A und Fig. 12B zeigen die radiale Intensitätsverteilung in der Brennebene einer sphärischen Linse, die mit den, durch ein Phasengitter erzeugten, konischen Wellen beleuchtet wurde, wobei die Aufnahmen mit einer CCD-Kamera gemacht und in 12A normal und in 12B überbelichtet wurden.

Nachfolgend wird zunächst das Meßprinzip beschrieben.

Das Verfahren dient zur Brennweiten- bzw. Brechkraftbestimmung von Sammellinsen (die auch fokussierende oder positive Linsen genannt werden) sowie positiven Linsensystemen. Für die Bestimmung der Brennweite einer Zerstreuungslinse (negative Linse) schaltet man dieser eine Sammellinse bekannter Brechkraft vor, so daß das Gesamtsystem wie eine Sammellinse wirkt. Aus der gemessenen Brennweite dieses Gesamtsystems und der bekannten Brennweite der Vorschaltlinse berechnet man dann die Brennweite der Zerstreuungslinse.

Zur Bestimmung der Brennweite bzw. der Brechkraft werden divergenzfrie Lichtbündel benutzt, die seit einigen Jahren intensiv untersucht werden [1, 2, 3, 4]. Man kann zeigen [1], daß das Raumfrequenzspektrum divergenzfreier Lichtbündel auf einem Ring lokalisiert ist. Dies bedeutet, daß divergenzfreie Bündel durch eine Überlagerung von Lichtwellen entstehen, deren Wellenvektoren sich auf einem Kegelmantel mit dem halben

Öffnungswinkel ϑ (im folgenden einfach Öffnungswinkel genannt) befinden. Aus diesem Grund bezeichnen wir divergenzfreie Bündel auch als konische Bündel.

In Fachkreisen bekannte Beispiele für konische Lichtbündel sind sogenannte BESSEL-Bündel, deren radiale Intensitätsverteilung zu $J_n^2(\alpha r)$ proportional ist. Dabei ist J_n die BESSEL-Funktion n-ter Ordnung und erster Art ($n = 0, 1, 2, \dots$), r die radiale Koordinate und α ein konstanter Faktor. Ideale BESSEL-Bündel können zwar wegen ihres unendlich großen Energieinhaltes nicht erzeugt werden, die mit verschiedenen Methoden (siehe später) realisierbaren Näherungen sind jedoch für die Belange dieser Erfindung ausreichend. Fig. 1 zeigt die Helligkeitsverteilung in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung eines Lichtbündels, das näherungsweise ein BESSEL-Lichtbündel ist. Die radiale Intensitätsverteilung $I(r)$, die man entlang der gestrichelten Linie in Fig. 1 erhält, ist näherungsweise proportional zum Quadrat der BESSEL-Funktion nullter Ordnung und erster Art, J_0^2 (siehe Fig. 2).

Beleuchtet man eine sphärische Sammellinse mit einem konischen Bündel, so wird — wie später noch gezeigt wird — die Intensitätsverteilung in ihrer hinteren Brennebene ein scharfer Ring sein (Fig. 3A), dessen Durchmesser d nur vom Öffnungswinkel ϑ der konischen Welle und der Brennweite f der Linse abhängt. Bei bekanntem ϑ kann man also durch Bestimmen von d die Brennweite f bzw. die Brechkraft $D = 1/f$ der Linse berechnen.

Im Falle einer astigmatischen Linse erhält man in den Brennebenen eine ovale Intensitätsverteilung die eine streifenförmige Struktur aufweist (Fig. 3B). Die Vermessung der Lage und Länge (a, b) der Achsen des Ovals und/oder seiner Struktur kann zur Bestimmung der Lage der Hauptmeridiane und der Brennweiten in den Hauptmeridianen der astigmatischen Linse verwendet werden.

Die Meßmethode scheint auf den ersten Blick nicht durchführbar zu sein, da der zu vermessende Ring bzw. das zu vermessende Oval in der hinteren Brennebene der Linse erscheint, deren Position man ja nicht kennt. Die Position der Brennebene kann jedoch durch einfaches Scharfstellen des Ringes bzw. des Ovals, d. h. durch Verschieben der Beobachtungsebene entlang der optischen Achse, ermittelt werden. Es ist dabei nicht nötig, den Abstand der Brennebene von der Linse bzw. den Abstand der Brennebene von den oft unbekannten Hauptebenen eines Linsensystems zu bestimmen. Benötigt wird lediglich der Durchmesser des scharfgestellten Ringes bzw. die Lage und Länge der Hauptachsen des Ovals und der Abstand der Streifen im Oval.

Nachfolgend wird eine kurze Erläuterung zu den verwendeten Lichtquellen angegeben.

Konische Lichtbündel werden üblicherweise durch Beleuchten bestimmter optischer Elemente mit Lichtwellen erzeugt, die näherungsweise ebene Wellen sind. Man kann dazu einen handelsüblichen Laser verwenden, z. B. einen Helium-Neon Laser oder einen Diodenlaser, dessen Lichtbündel mit Hilfe einer Aufweitungsoptik im Durchmesser vergrößert wird. Die Aufweitungsoptik enthält typischerweise zwei konfokal angeordnete Linsen und kann zur Verbesserung des Bündelprofils auch räumliche Filter enthalten. Die Verwendung eines Lasers ist allerdings nicht unbedingt notwendig.

Zur Erzeugung von (näherungsweise) konischen Wellen werden in der Literatur verschiedene Methoden angegeben [2, 3, 4], die sich vor allem in ihrer Konversionseffizienz, also dem Verhältnis zwischen der Leistung, die in der erzeugten konischen Welle enthalten ist, und der eingestrahnten Leistung unterscheiden. Für die Erfindung ist die Konversionseffizienz allerdings von untergeordneter Bedeutung.

Im einfachsten Fall verwendet man zur Erzeugung einer konischen Welle ein sogenanntes Axicon (flacher Glaskegel) [5], das die Höhe H und den Radius R besitzen soll (Fig. 4). Beleuchtet man dieses von der Basis mit einer näherungsweise ebenen Welle, wird sie in eine konische Welle transformiert. Für den praktisch interessanten Fall $H/R \ll 1$, ist auch der Öffnungswinkel ϑ dieser Welle klein. Er berechnet sich dann aus der Geometrie des Axicons und dem Brechungsindex n des verwendeten Glases wie folgt:

$$\vartheta = \frac{H}{R}(n - 1). \quad (1)$$

Die radiale Intensitätsverteilung der Welle wird, in einem gewissen Entfernungsbereich vom Axicon, in guter Näherung durch das Quadrat der BESSEL-Funktion nullter Ordnung, $J_0^2(\alpha r)$, wiedergegeben (siehe Fig. 2). Dabei ist α gegeben durch

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda}\vartheta, \quad (2)$$

wobei λ die Wellenlänge des Lichtes ist.

Weiterhin können konische Wellen erzeugt werden, indem man eine kreisförmige Schlitzblende mit dem Durchmesser d_R , die sich in der vorderen Brennebene einer sphärischen Linse mit der Brennweite f befindet, mit einer ebenen Welle beleuchtet [2]. Das Feld in einem gewissen Entfernungsbereich hinter der Linse entspricht dann näherungsweise dem eines BESSEL-Bündels, falls die Breite δ des Schlitzes klein ist gegen den Durchmesser d_R der Schlitzblende, $\delta \ll d_R$. Für den Öffnungswinkel der erzeugten konischen Welle erhält man den Wert

$$\vartheta = \arctan \left(\frac{d_R}{2f} \right). \quad (3)$$

Eine weitere Methode zur Erzeugung von konischen Wellen stellt das Beleuchten eines radialsymmetrischen Amplituden- oder Phasengitters mit der Gitterkonstanten p durch eine näherungsweise ebene Welle dar. Man kann zeigen [6], daß das dadurch erzeugte Lichtbündel eine Überlagerung von konischen Wellen mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln ϑ_m ist. Wir bezeichnen die konische Welle mit dem Öffnungswinkel ϑ_m als m -te Ordnung. Die Öffnungswinkel ϑ_m kann man wie folgt aus der Wellenlänge λ des beleuchtenden Lichtes und der Gitterkonstanten p berechnen. Für $m\lambda/p \ll 1$, was in der Praxis üblicherweise erfüllt ist, erhält man

$$\vartheta_m = m \frac{\lambda}{p}, \quad (4)$$

wobei $m = 1, 2, 3, \dots$ ist.

Technisch einfach zu realisierende Spezialfälle solcher Gitter sind binäre Gitter, die nur zwei Stufen der Amplituden- bzw. Phasentransmission enthalten. Das einfachste binäre Gitter ist ein radialsymmetrisches Gitter aus konzentrischen Ringen gleichen Abstandes und gleicher Breite $p/2$ die abwechselnd lichtdurchlässig und lichtundurchlässig sind (Fig. 5). Die Öffnungswinkel der von einem solchen Gitter erzeugten konischen Wellen berechnet man mit Gl. (4), wobei man beachten muß, daß m in diesem Fall nur ungerade Werte annimmt [6]. Statt der konzentrischen, abwechselnd lichtdurchlässig und lichtundurchlässigen Ringe kann man auch ein völlig transparentes binäres Gitter mit der Gitterkonstanten p verwenden, das aus einem Substrat (z. B. Glas) besteht, in das konzentrische Ringe gleicher Breite $p/2$ der Tiefe T eingearbeitet wurden (Fig. 6). Die Phasendifferenz des Lichts zwischen den radialsymmetrischen Stufen mit der Tiefe T soll π betragen. Aus dem zugehörigen Gangunterschied $\lambda/2$ berechnet man:

$$T = \frac{\lambda/2}{n-1}. \quad (5)$$

Darin ist λ die Wellenlänge des verwendeten Lichts und n der Brechungsindex des Substrats. Für ein typisches optisches Glas wie z. B. BK7 ($n \approx 1,5$) und eine Wellenlänge von $\lambda = 632 \text{ nm}$ (Helium-Neon-Laser) erhält man eine Tiefe T von $T \approx 0,63 \mu\text{m}$. Das binäre Phasengitter besitzt gegenüber dem binären Amplitudengitter den Vorteil einer ca. 10 mal größeren Konversionseffizienz. Das erzeugte Bündel unterscheidet sich von dem, durch das Amplitudengitter erzeugten Bündel nur durch die Leistungen in den konischen Wellen mit verschiedenen Öffnungswinkeln ϑ_m . Die Werte für ϑ_m berechnet man wieder mit Gl. (4).

Überlagert man die radialsymmetrische Struktur dieser Gitter mit einem Strichgitter in einer bestimmten Weise, die in [3] beschrieben wurde, so erhält man die aus der Holographie bekannten, sogenannten Off-Axis Gitter (Fig. 7). Der Vorteil eines Off-Axis Gitters besteht darin, daß sich die einzelnen konischen Wellen mit den Öffnungswinkeln ϑ_m unter verschiedenen Winkeln γ_m zur optischen Achse ausbreiten. In der Brennebene der zu vermessenden Linse führt dies zu einer räumlichen Trennung der Ringmittelpunkte, die zu verschiedenen Ordnungen gehören (Fig. 8).

Nun wird die Bestimmung der Brennweite bzw. Brechkraft einer sphärischen Linse erläutert.

Um mit einem konischen Lichtbündel die Brennweite bzw. Brechkraft einer sphärischen Linse zu bestimmen, benutzt man die Tatsache, daß das Lichtfeld in der hinteren Brennebene einer solchen Linse die FOURIER-Transformierte des Feldes in ihrer vorderen Brennebene ist. Berechnet man die FOURIER-Transformierte einer konischen Welle, die z. B. durch ein Axicon erzeugt wurde, erhält man einen scharfen Ring (siehe Fig. 3A) [1]. Der Durchmesser d dieses Ringes ist dabei nur von der Brennweite f bzw. der Brechkraft $D = 1/f$ der Linse und dem Öffnungswinkel ϑ des Bündels abhängig. Man erhält

$$d = 2f \tan \vartheta. \quad (6)$$

Durch Messen des Durchmessers d des Ringes kann man also bei bekanntem ϑ mit Gl. (6) die Brennweite der Linse bestimmen. Die Zusammenhänge von ϑ mit der Geometrie der optischen Elemente, die die konischen Bündel erzeugen, sind oben angegeben.

Benutzt man binäre Amplituden- oder Phasengitter mit der Gitterkonstanten p , erhält man — wie bereits erwähnt — eine Überlagerung konischer Wellen unterschiedlicher Öffnungswinkel ϑ_m . In der Brennebene erscheinen deshalb mehrere scharfe, konzentrische, kreisförmige Ringe. Fig. 9 zeigt ein Beispiel mit drei Ringen, die die Durchmesser d_1 , d_3 und d_5 besitzen. Der Zusammenhang der Durchmesser d_m der Ringe mit der Brennweite f der Testlinse ist für $m\lambda/p \ll 1$ gegeben durch

$$d_m = m \bar{d}, \quad (7)$$

mit

$$\bar{d} = 2f \frac{\lambda}{p}. \quad (8)$$

Die Tatsache, daß von diesen Gittern durch sphärische Linsen mehrere konzentrische Ringe bzw. durch astigmatische Linsen mehrere Ovale erzeugt werden, kann zur Erhöhung der Meßgenauigkeit verwendet werden, indem man die Brennweite aus den Meßwerten der verschiedenen Durchmesser d_m bestimmt und auf geeignete Weise einen Mittelwert bildet.

Im Falle astigmatischer Linsen geht man wie folgt vor.

Astigmatische Linsen besitzen zwei Hauptmeridiane mit den zugehörigen Brennweiten f_1 und f_2 bzw. Brechkraften D_1 und D_2 . Man kann sie als Kombination einer sphärischen Linse mit der Brechkraft

$$D_s = 1/f_s \quad (9)$$

und einer zylindrischen Linse mit der Brechkraft

$$D_z = 1/f_z \quad (10)$$

betrachten. Die Brechkraften der Hauptmeridiane ergeben sich zu

$$\frac{1}{f_1} = D_1 = D_s \quad (11)$$

und

$$\frac{1}{f_2} = D_2 = D_s + D_z. \quad (12)$$

Die astigmatische Linse besitzt zwei Brennebenen F_1 und F_2 , die sich in den Abständen $f_1 = 1/D_1$ und $f_2 = 1/D_2$ von der Linse befinden. Das Bild einer konischen Welle in diesen beiden Ebenen ist ein Oval, dessen Inneres eine streifenförmige Struktur zeigt (Fig. 3B und Fig. 10). Die Lage der Hauptachsen des Ovals gibt die Richtung der beiden Hauptmeridiane an. Die Richtung der großen Hauptachse in der Brennebene F_1 steht senkrecht auf der Richtung der großen Hauptachse in der Brennebene F_2 .

In der Brennebene F_j ($j = 1$ oder 2) gilt folgender Zusammenhang zwischen der Länge b_j der kleinen Hauptachse, dem Öffnungswinkel ϑ der konischen Welle und der Brennweite f_j ($j = 1$ oder 2):

$$b_j = 2f_j \tan \vartheta. \quad (13)$$

Die Brennweite f_z des zylindrischen Anteils der Linse erhält man aus dem Abstand Δd_j der Streifen im Oval (siehe Fig. 3B). In der Brennebene F_j ($j = 1$ oder 2) gilt für $\vartheta \ll 1$

$$\Delta d_j = \frac{f_j}{f_z} \frac{\lambda}{2\vartheta}. \quad (14)$$

Es gibt zwei Möglichkeiten, die Brennweiten f_1 und f_2 zu bestimmen. i) Man bestimmt die kleinen Hauptachsen b_1 und b_2 in beiden Brennebenen und wendet Gl. (13) an. ii) Man bestimmt Δd und b in einer Brennebene und wendet Gl. (13) und (14) an.

Beispiel zu i): Bestimmt man die kleinen Hauptachsen b_1 und b_2 in den Brennebenen F_1 und F_2 , so erhält man die Brennweiten aus Gl. (13) zu

$$f_1 = \frac{b_1}{2 \tan \vartheta}, \quad (15)$$

$$f_2 = \frac{b_2}{2 \tan \vartheta}. \quad (16)$$

Die sphärischen und zylindrischen Brechkraften D_s und D_z berechnet man aus den Gln. (11) und (12).

Beispiel zu ii): Bei Messung der kleinen Hauptachse b_1 und des Streifenabstands Δd_1 z. B. in der Brennebene F_1 , berechnet man f_1 nach Gl. (15) und f_2 nach Gl. (10)–(14) zu

$$f_2 = \frac{b_1 \lambda}{2(\lambda + 2\Delta d_1 \vartheta) \tan \vartheta} \quad (17)$$

Man kann durch Auswerten der kleinen Hauptachsen b und des Abstandes Δd mehrerer Streifen in beiden Brennebenen und geeignete Mittelwertbildung die Genauigkeit der Bestimmung der Brennweiten f_1 und f_2 erhöhen.

Als weitere Größe läßt sich die große Hauptachse a des Ovals heranziehen. Aus den gemessenen Hauptachsen a und b in einer Brennebene lassen sich ebenfalls die Brennweiten f_1 und f_2 bestimmen.

Die Detektion und Auswertung erfolgt folgendermaßen:

Die zur Bestimmung der Brennweite erforderliche Intensitätsverteilung in der Brennebene einer sphärischen bzw. in den Brennebenen einer astigmatischen Linse, wird typischerweise mit einer handelsüblichen CCD-Kamera aufgenommen (CCD = charge-coupled-device). Solche CCD-Kameras können normalerweise an einen Computer angeschlossen werden, der dann die Auswertung, d. h. die Bestimmung der Durchmesser bzw. der Länge der Hauptachsen und der Streifenabstände, mit Hilfe geeigneter Bildverarbeitungssoftware automatisch durchführen kann. Die gesuchten Brennweiten können mit Hilfe dieses Computers und den oben beschriebenen Gleichungen berechnet werden. Weiterhin ist es möglich, die Kamera mit Hilfe einer handelsüblichen Autofokus-Einrichtung bzw. eines geeigneten Computerprogrammes automatisch in die Brennebene der Linse zu bewegen und damit den Meßprozeß vollständig zu automatisieren.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung wird im folgenden anhand der schematischen Zeichnung (Fig. 11) näher erläutert.

Als Lichtquelle dient ein Helium-Neon Laser 111, der rotes Licht der Wellenlänge 632,8 nm emittiert. Der Durchmesser (ca. 5 mm) des emittierten Lichtbündels wird durch die Aufweitungsoptik 112, die die beiden konfokal angeordneten Linsen 113 und 114 enthält, auf ca. 5 cm vergrößert. Die Brennweite der Linse 113 beträgt 100 mm, die der Linse 114 beträgt 1000 mm. Das aufgeweitete Bündel beleuchtet ein radialsymmetrisches binäres Phasengitter 115 mit der Gitterkonstanten $p = 714 \mu\text{m}$, das einen Durchmesser von ca. 2 cm besitzt. Dieses Gitter erzeugt ein Lichtbündel, das aus einer Überlagerung konischer Wellen besteht, deren Öffnungswinkel mit Gl. (4) berechnet werden. Das Lichtbündel beleuchtet die Testlinse 116. Die CCD-Kamera 117 wird auf der optischen Achse verschoben, bis die Ringe bzw. Ovale in der Brennebene der Testlinse scharfgestellt sind. Die CCD-Kamera 117 nimmt dann die Intensitätsverteilung in der Brennebene der Testlinse auf. Der Computer 118 wertet das von der CCD-Kamera 117 gelieferte Bild aus und bestimmt daraus durch Anwenden der Gln. (7) und (8) die Brennweite f bzw. Brechkraft $D = 1/f$ der Linse.

Fig. 12 zeigt die radiale Intensitätsverteilung in der Brennebene, die mit diesem Ausführungsbeispiel für eine sphärische Testlinse aufgenommen wurde. Die Aufnahme 12A ist normal belichtet. Die Aufnahme 12B ist überbelichtet, damit auch die äußeren Ringe deutlich sichtbar sind. Die Durchmesser der Ringe wurden zu $d_1 = 0,425 \text{ mm}$, $d_3 = 1,35 \text{ mm}$, $d_5 = 2,22 \text{ mm}$, $d_7 = 3,11 \text{ mm}$ und $d_9 = 3,99 \text{ mm}$ bestimmt. Daraus berechnet der Computer eine Brennweite von $f = 254 \text{ mm}$ bzw. eine Brechkraft von 3,93 Dioptrien.

Die Erfindung ist nicht auf das vorstehende Ausführungsbeispiel begrenzt, sondern umfaßt zahlreiche Ausgestaltungen insbesondere im Rahmen der Ansprüche.

Literatur

- [1] G. Indebetouw, Nondiffracting optical fields: some remarks on their analysis and synthesis, J. Opt. Soc. Am. A 6 (1989) 150.
- [2] J. Durnin, J. J. Miceli, Jr., Diffraction-Free Beams, Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 1499.
- [3] A. Vasara, J. Turunen, A. T. Friberg, Realization of general nondiffracting beams with computer-generated holograms, J. Opt. Soc. Am. A 6 (1989) 1748.
- [4] A. J. Cox, D. C. Dibble, Nondiffracting beam from a spatially filtered Fabry-Perot resonator, J. Opt. Soc. Am. A 9 (1992) 282.
- [5] J. H. McLeod, The Axicon: A New Type of Optical Element, J. Opt. Soc. Am. 44 (1954) 592.
- [6] L. Niggel, Die Erzeugung von BESSEL-Lichtbündeln und ihre Anwendung in der stimulierten Ramanstreuung, Diplomarbeit Universität Regensburg NWF II-Physik Aug. 1995.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen der Brennweite oder der Brechkraft einer sphärischen Testlinse oder eines Linsensystems, oder der Brechkraft einer astigmatischen Linse in ihren beiden Hauptmeridianen sowie insbesondere auch deren Lage, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine Lichtquelle (111), ein ein konisches Lichtbündel erzeugendes Element (115), die zu testende Linse oder das zu testende Linsensystem (116), ein Detektor (117) zur Bestimmung der Intensitätsverteilung in der oder den Brennebenen sowie vorzugsweise eine Auswerteeinheit (118) verwendet werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bestimmung der Brennweite bzw. Brechkraft einer negativen Linse (Zerstreuungslinse) oder eines negativen Linsensystems, der Linse oder dem Linsensystem eine geeichte positive Linse (Sammellinse) vorgeschaltet ist, so daß das Gesamtsystem positiv ist und man aus der gemessenen Brennweite des Gesamtsystems und der bekannten Brennweite der positiven Vorschaltlinse die Brennweite der negativen Linse oder des negativen Linsensystems berechnet.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß als Lichtquelle (111) ein Laser verwendet wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß das vom Laser erzeugte Lichtbündel mit einer Aufweitungsoptik (117) im Durchmesser vergrößert wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1—4, dadurch gekennzeichnet, daß die konische Welle mit dem Öffnungswinkel ϑ ein BESSEL-Bündel oder eine Näherung an ein BESSEL-Bündel ist.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1—4, dadurch gekennzeichnet, daß die konischen Wellen mit den Öffnungswinkeln ϑ_m Überlagerungen von BESSEL-Bündeln oder Überlagerungen von Näherungen an BESSEL-Bündel sind.
7. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzeugung des BESSEL-Bündels ein Axicon verwendet wird.
8. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzeugung des BESSEL-Bündels eine Ringblende, die sich in der Brennebene einer sphärischen Linse befindet, verwendet wird.
9. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erzeugung der Überlagerung von BESSEL-Bündeln optische Gitter verwendet werden, die die Amplitude und/oder die Phase des die Gitter beleuchtenden Lichts verändern.
10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß ein binäres Amplituden-Gitter zur Erzeugung der konischen Wellen verwendet wird.
11. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß ein binäres Phasen-Gitter zur Erzeugung der konischen Wellen verwendet wird.
12. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Gitter der Ansprüche 10 und 11, sogenannte Off-Axis Gitter sind.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1—12, dadurch gekennzeichnet, daß die radiale Intensitätsverteilung $I(x, y, z_0)$ des Lichtfeldes in einer Ebene x, y mit dem beliebigen Abstand z_0 von der Linse mit Hilfe eines geeigneten Detektors gemessen wird und daß durch Auswertung dieser Intensitätsverteilung im Falle einer sphärischen Linse oder eines sphärischen Linsensystems die Brennweite f , bzw. im Falle einer astigmatischen Linse oder eines astigmatischen Linsensystems die Brennweiten in den beiden Hauptmeridianen und deren Lage, bestimmt werden.
14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Intensitätsverteilung im Falle einer sphärischen Testlinse (116) in der hinteren Brennebene der Linse und im Falle einer astigmatischen Testlinse in einer oder beiden Brennebenen der Linse gemessen wird.
15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß eine konische Welle verwendet wird und die Brennweite einer sphärischen Linse (116) durch Anwenden der Formel

$$f = \frac{d}{2 \tan \vartheta} \quad (18)$$

bzw. der Näherungsformel

$$f \approx \frac{d}{2\vartheta} \quad (19)$$

bestimmt wird, wobei mit

f die Brennweite der Linse oder des Linsensystems, mit

d der Durchmesser der ringförmigen Intensitätsverteilung und mit

ϑ der Öffnungswinkel des konischen Bündels bezeichnet wird.

16. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß eine Überlagerung von konischen Wellen verwendet wird und die Brennweite f einer sphärischen Linse (116) durch Anwenden der Formel

$$f_m = \frac{d_m}{2 \tan \vartheta_m} \quad (20)$$

bzw. der Näherungsformel

$$f_m \approx \frac{d}{2\vartheta_m} \quad (21)$$

auf die m -te Ordnung oder durch geeignete Mittelwertbildung aus den Werten f_m bestimmt wird, wobei mit m -ter Ordnung die konische Welle mit dem Öffnungswinkel ϑ_m , mit d_m der Durchmesser der kreisförmigen Intensitätsverteilung der m -ten Ordnung in der Brennebene und mit

f_m die daraus bestimmte Brennweite der Linse oder des Linsensystems bezeichnet wird.

17. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Brennweiten f_1 und f_2 in den Hauptmeridianen einer astigmatischen Linse durch Vermessen der Intensitätsverteilung in den beiden Brennebenen F_1 und F_2 und Anwenden folgender Gleichungen bestimmt werden

$$f_1 = \frac{b_1}{2 \tan \vartheta}, \quad (22)$$

$$f_2 = \frac{b_2}{2 \tan \vartheta}, \quad (23)$$

wobei

ϑ der Öffnungswinkel der konischen Welle,

b_1 die Länge der kleinen Hauptachse des Ovals in der Brennebene F_1 und

b_2 die Länge der kleinen Hauptachse des Ovals in der Brennebene F_2 ist, und wobei die sphärischen und zylindrischen Brechkräfte, D_s und D_z folgendermaßen berechnet werden:

$$D_s = \frac{1}{f_1}, \quad (24)$$

$$D_z = \frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1}. \quad (25)$$

18. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Brennweiten f_1 und f_2 in den Hauptmeridianen einer astigmatischen Linse durch Vermessen der Intensitätsverteilung in nur einer der beiden Brennebenen, z. B. F_1 , und Anwenden von Gl. (22) und folgender Gleichung bestimmt werden:

$$f_2 = \frac{b_1 \lambda}{2(\lambda + 2\Delta d_1 \vartheta) \tan \vartheta} \quad (26)$$

wobei

λ die Wellenlänge des verwendeten Lichts;

Δd_1 der Abstand der Streifen im Oval, und

ϑ der Öffnungswinkel der konischen Welle ist, und wobei in der Brennebene F_2 Gl. (23) und folgende Gleichung gelten:

$$f_1 = \frac{b_2 \lambda}{2(\lambda - 2\Delta d_2 \vartheta) \tan \vartheta} \quad (27)$$

19. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Brennweiten f_1 und f_2 in den Hauptmeridianen einer astigmatischen Linse aus den gemessenen Längen der Hauptachsen a und b des Ovals in einer Brennebene bestimmt werden.

20. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Lage der Hauptmeridiane der astigmatischen Linse aus der Lage der Hauptachsen des Ovals in einer und/oder beiden Brennebenen der Linse bestimmt wird.

21. Verfahren nach einem der Ansprüche 1—20, dadurch gekennzeichnet, daß die Intensitätsverteilung mit einem auf der optischen Achse beweglichen elektronischen Detektor aufgenommen wird.

22. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß der elektronische Detektor eine handelsübliche CCD-Kamera ist.

23. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß eine Autofokuseinrichtung vorhanden ist, die den elektronischen Detektor automatisch in die Brennebene einer sphärischen Linse oder eine oder beide Brennebenen einer astigmatischen Linse bringt.

24. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß mit Hilfe eines geeigneten Computerprogrammes der elektronische Detektor automatisch in die Brennebene einer sphärischen oder eine oder beide Brennebenen einer astigmatischen Linse gebracht wird.

25. Verfahren nach einem der Ansprüche 1—24, dadurch gekennzeichnet, daß die Durchmesser der Ringe oder die Hauptachsen der Ovale und die Abstände der Streifen in den Ovalen mit Hilfe eines Computers,

der über geeignete Bildverarbeitungs-Software verfügt, bestimmt werden.

26. Verfahren nach Anspruch 25, dadurch gekennzeichnet, daß die Brennweite mit Hilfe eines Computers berechnet wird.

27. Vorrichtung zum Bestimmen der Brennweite oder der Brechkraft einer sphärischen Testlinse oder eines Linsensystems, oder der Brechkraft einer astigmatischen Linse in ihren beiden Hauptmeridianen sowie insbesondere auch deren Lage, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine Lichtquelle (111), ein ein konisches Lichtbündel erzeugendes Element (115), die zu testende Linse oder das zu testende Linsensystem (116), ein Detektor (117) zur Bestimmung der Intensitätsverteilung in der oder den Brennebenen sowie vorzugsweise eine Auswerteeinheit (118) enthalten ist.

28. Vorrichtung nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, daß sie zur Ausführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 — 26 ausgelegt ist.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

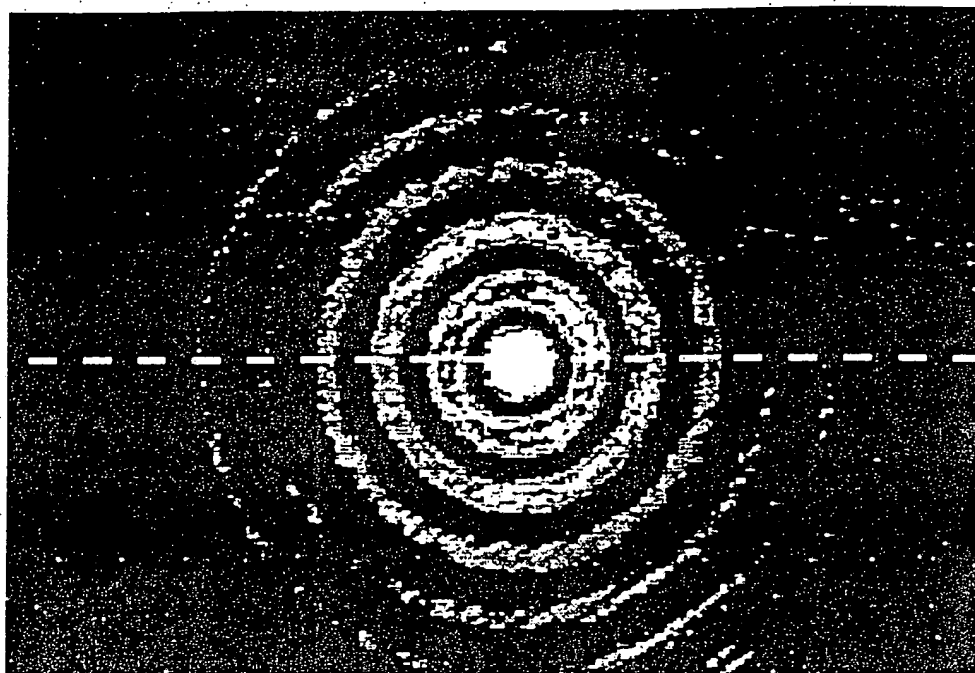


Fig. 1

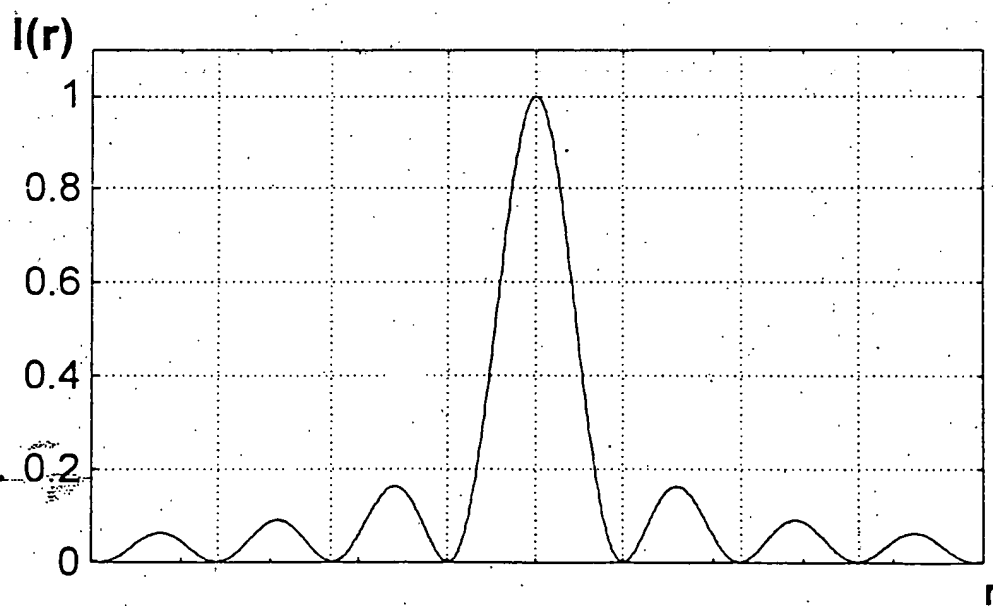


Fig. 2

Fig. 3A

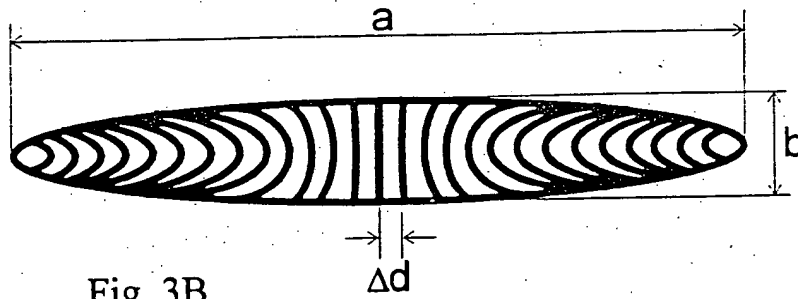
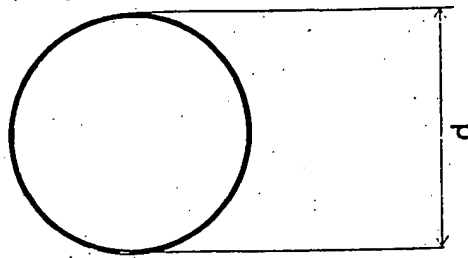


Fig. 3B

Fig. 4

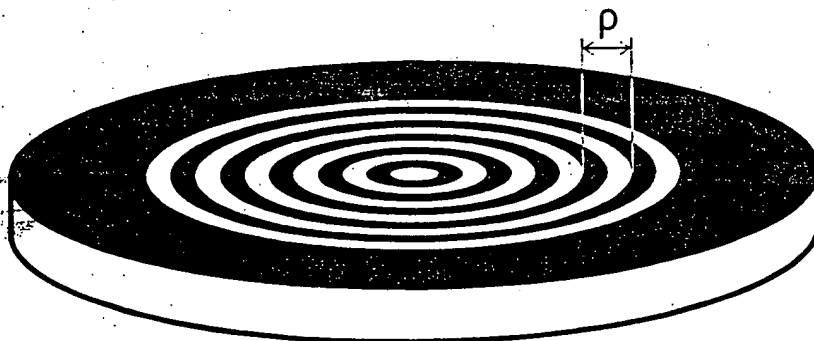
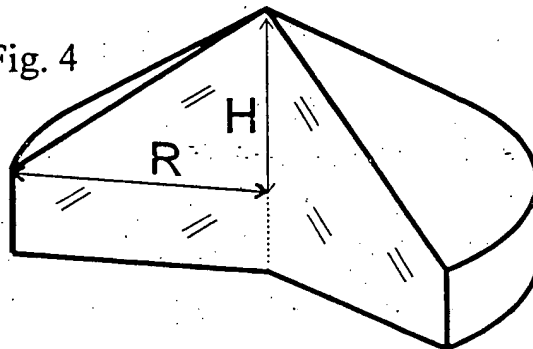


Fig. 5

Fig. 6

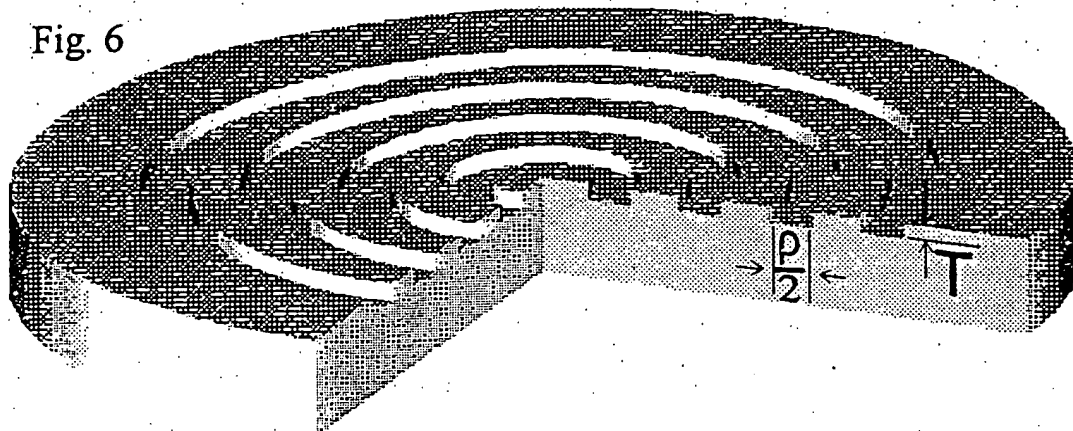


Fig. 7

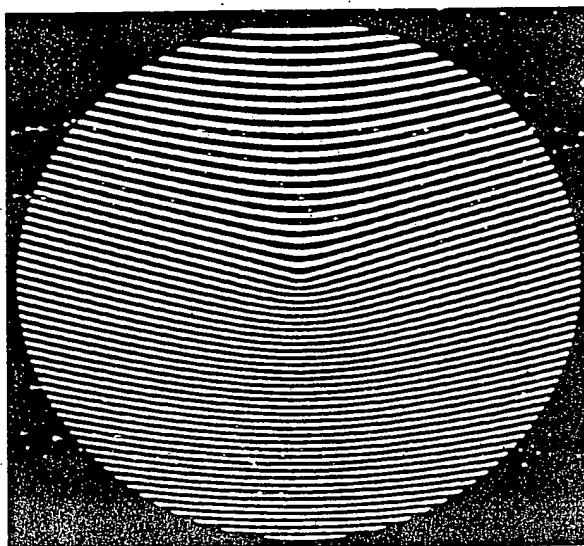


Fig. 12A

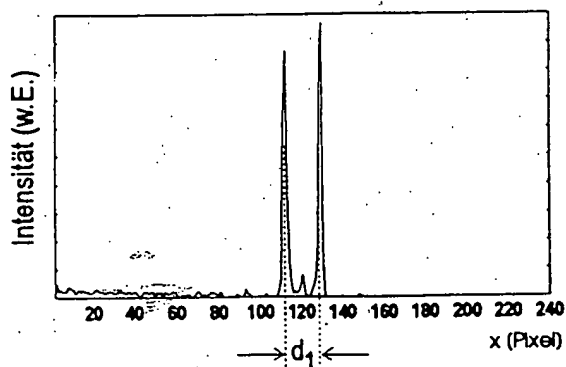
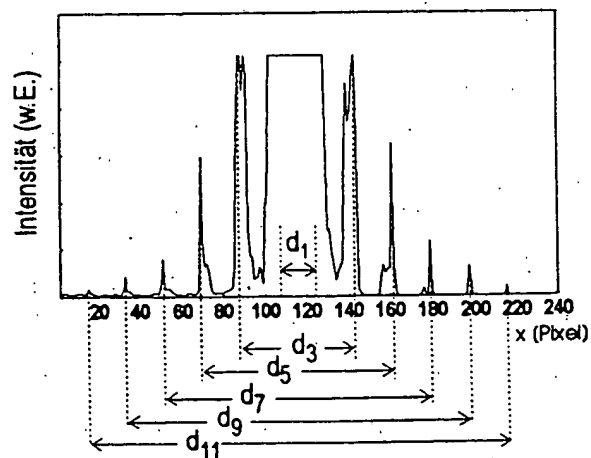


Fig. 12B



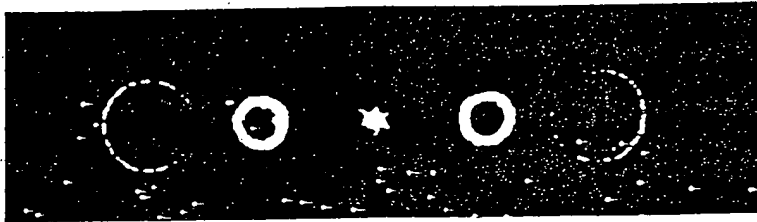


Fig. 8:

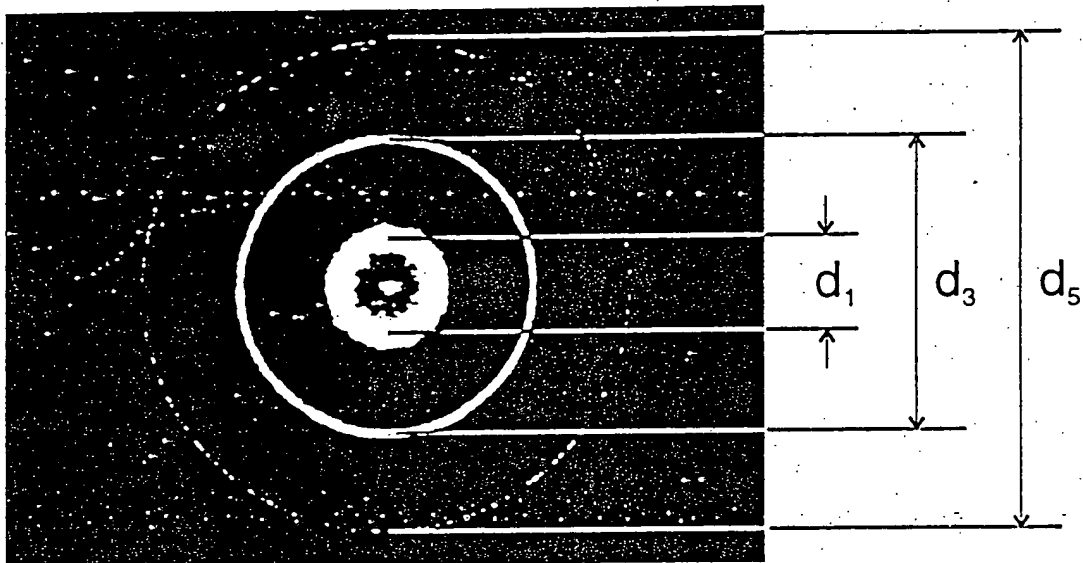


Fig. 9:

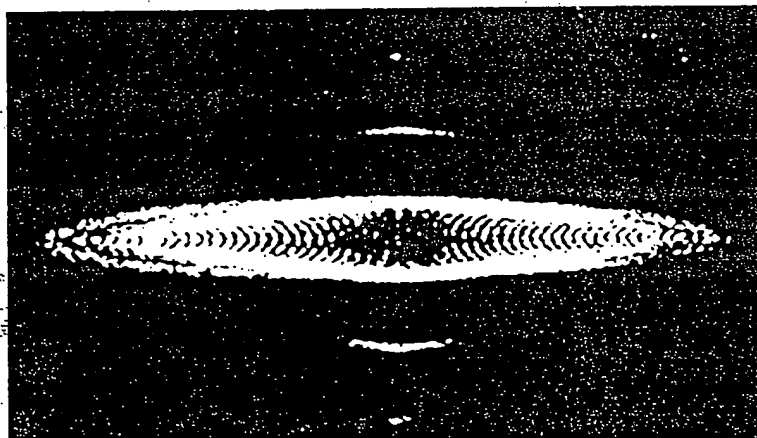
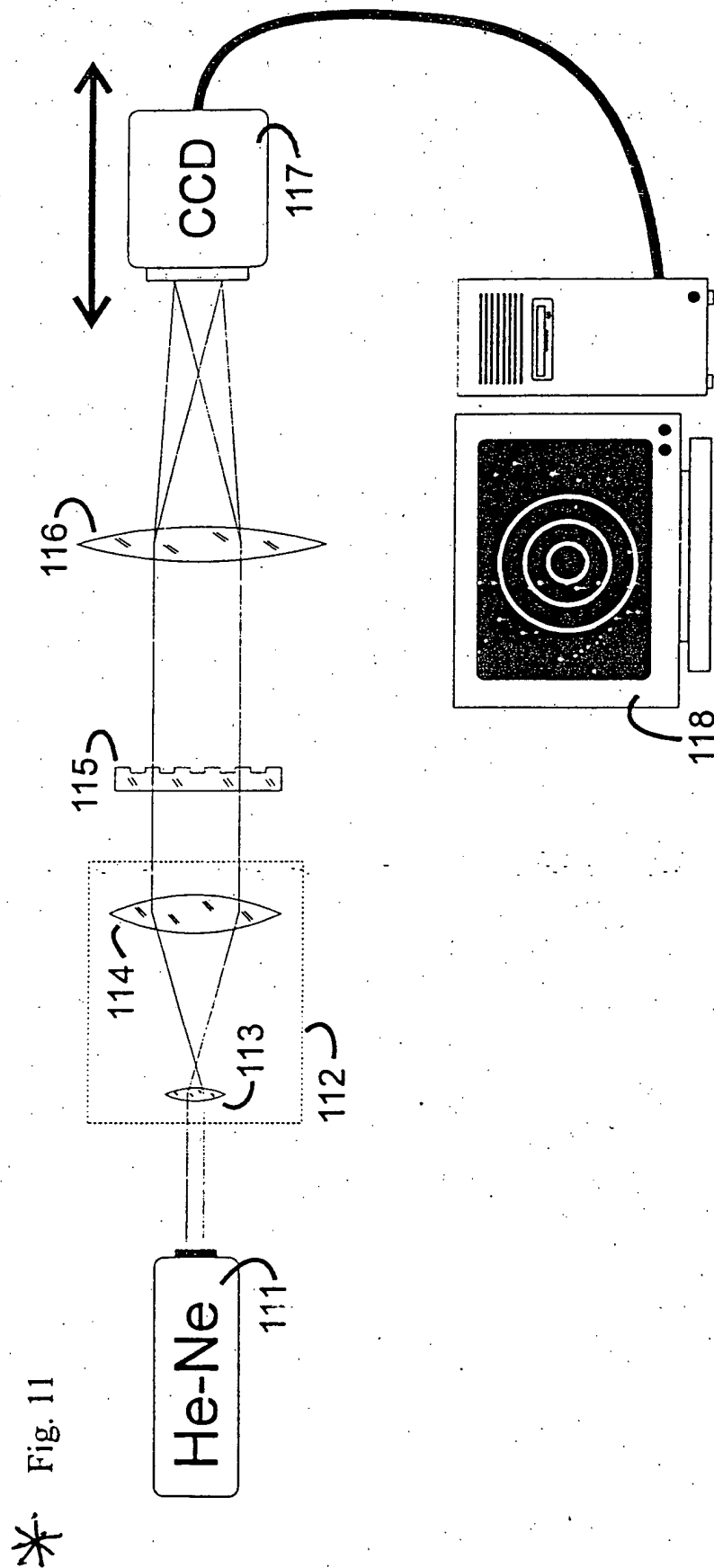


Fig. 10:



* Fig. 11